

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Měření mezního stavu deformace při zkoušce rozšiřování otvoru pomocí optického systému ARAMIS

The determination of the deformation gradient around the hole during testing of the hole enlargement measured by the ARAMIS optical system

Jiří Knížek

KSP – TP - B

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph. D. - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Pavel Solfronk, Ph. D. - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	45
Počet tabulek:	5
Počet příloh:	0
Počet obrázků:	39
Počet jiných příloh:	1 CD

Datum: 24.5.2013



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Jiří K N Í Ž E K
Studijní program	B2341 Strojírenství
Studijní obor	3911R018 Materiály a technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářské práce na téma:

Měření mezního stavu deformace při zkoušce rozšiřování otvoru pomocí optického systému ARAMIS

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Základní technologické zkoušky tvařitelnosti ocelových plechů.
2. Základní principy fotogrammetrie a možnosti optického měření deformace.
3. Seznámení se s principem bezkontaktního měření deformace pomocí optického systému ARAMIS.
4. Experimentální zjištění mezního stavu deformace při zkoušce rozšiřování otvoru pomocí optického systému ARAMIS.
5. Vyhodnocení výsledků měření.
6. Závěr.





Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 30 stran
- přílohy: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] PETRUŽELKA, J.: *Úvod do tváření I.*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava 2001, ISBN 80-7078-877-1.
- [2] MACHEK, V. VESELÝ, L. VESELÝ, M. VIŠŇÁK, J.: *Zpracování tenkých plechů*, SNTL Praha, 1983.
- [3] POHLANDT, K.: *Materials Testing for the Metal Forming Industry*, Springer-Verlag Berlin, 1989.
- [4] BOLJANOVIC, V.: *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*, New York 2004, ISBN 0-8311-3182-9.
- [5] ASM HANDBOOK 14B. *Sheet metal forming*, ASM INTERNATIONAL 2004, ISBN-13:978-0-87170-710-9.
- [6] DAVIS, J.R.: et al. *ASM Metals Handbook, Vol. 14, Forming and Forging*. 9. vydání, [s.l.], ASM International, 1988, 978 s. ISBN 0871700204.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry



doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 15. 2. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B 2341 – Strojírenství

Student: Jiří Knížek

Téma práce: Měření mezního stavu deformace při zkoušce rozšiřování otvoru pomocí optického systému ARAMIS

The determination of the deformation gradient around the hole during testing of the hole enlargement measured by the ARAMIS optical system

Číslo BP: KSP – TP - B

Vedoucí BP: Ing. Jiří Sobotka, Ph. D. - *TU v Liberci*

Konzultant BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph. D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Tato bakalářská práce je zaměřena na zjišťování velikosti přetvoření φ v okolí otvoru při zkoušce rozšiřování otvoru, která byla vyhodnocena pomocí manuálního měření a optického systému ARAMIS. V teoretické části bakalářské práce je popsána tvářitelnost plechů a jejich hodnocení. Dále jsou popsány základy fotogrammetrie a optické měřicí systémy pracující na tomto principu. V experimentální části je popsáno měření zkoušky rozšiřování otvoru a zjišťování velikosti přetvoření φ . Hlavním cílem této bakalářské práce bylo porovnání výsledků obou způsobu měření.

Abstract:

This bachelor thesis is focused on stating the strain extent φ around the hole enlarged by the test and evaluation by manual measuring and by Aramic optical system as well. The theoretical part of the thesis describes the formability of the metal plates and the ways of its evaluation. Further we introduced the keystones of the photogrammetry and the optical measuring systems which work on this principle. In practical part we described the test of measuring the enlarging hole and stating the strain extent φ . The aim of this thesis was to compare the results obtained from both types of measuring.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....

Jiří Knížek

Na Sídlišti 546

507 23 Libáň

Poděkování

Velice rád bych poděkoval zejména vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. za jeho profesionální a odborný dohled po celou dobu tvorby této bakalářské práce. Zároveň děkuji za rady v části teoretické i experimentální a za pomoc při doplňování odborných znalostí. Velký dík patří i panu Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D., který mi pomohl při realizaci experimentu.

Dále děkuji všem členům Katedry strojírenské technologie - oddělení tváření kovů a plastů TUL, kteří mi velice pomáhali během mého studia. Také děkuji všem ostatním zaměstnancům TUL, se kterými jsem se po dobu mého studia setkal.

Především bych chtěl poděkovat mým rodičům, kteří mi umožnili studium na Technické univerzitě v Liberci. Dále děkuji za podporu při studiu své přítelkyni, kamarádům, známým a kolegům z mého zaměstnání.

Děkuji všem!

Jiří Knížek



Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů	- 7 -
1. Úvod	- 10 -
2. Tvářitelnost a hodnocení tvářitelnosti.....	- 11 -
3. Zkoušky materiálů	- 13 -
3.1. Zkouška tahem.....	- 13 -
3.2. Zkouška ohybem.....	- 17 -
3.3. Zkouška hloubením dle Erichsena.....	- 19 -
3.4. Zkouška rozšiřováním otvoru	- 20 -
4. Fotogrammetrie.....	- 23 -
4.1. Historický vývoj fotogrammetrie	- 23 -
4.2. Základy optického zobrazení.....	- 25 -
4.3. Optické měřicí systémy	- 26 -
4.3.1. Optický systém ARAMIS	- 27 -
4.3.2. Optický systém ARGUS.....	- 28 -
4.3.3. Optický systém PONTOS	- 29 -
5. Experimentální část	- 30 -
5.1. Popis testovaného materiálu	- 30 -
5.2. Zkoušky rozšiřováním otvoru - příprava vzorků.....	- 31 -
5.3. Zkoušky rozšiřováním otvoru - manuální měření	- 32 -
5.4. Zkoušky rozšiřováním otvoru - měření optickým systémem ARAMIS.....	- 36 -
6. Porovnání výsledků a doporučení pro další výzkum	- 42 -
7. Závěr	- 44 -
8. Seznam použité literatury	- 45 -



Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení:	Jednotka:	Význam:
A		Předmět v optickém zobrazení
A'		Obraz v optickém zobrazení
A_x	[%]	Tažnost materiálu
A_{50mm}	[-]	Tažnost materiálu na 50 mm délky vzorku
A_{80mm}	[-]	Tažnost materiálu na 80 mm délky vzorku
a	[mm]	Předmětová vzdálenost
a'	[mm]	Obrazová vzdálenost
d	[mm]	Průměr vzorku
d'	[mm]	Poměrné rozšíření otvoru
d_0	[mm]	Počáteční průměr vzorku pro zkoušku tahem
d_0	[mm]	Počáteční průměr otvoru pro ZRO
d_f	[mm]	Konečný průměr otvoru po ZRO
dL		Částice délky
d_{max}	[mm]	Maximální průměr otvoru
d_{min}	[mm]	Minimální průměr otvoru
F	[N]	Zatěžující síla
F		Předmětové ohnisko
F'		Obrazové ohnisko
F_{max}	[N]	Maximální zatěžující síla
f	[mm]	Ohnisková vzdálenost
h	[mm]	Hloubka prohloubení
L	[mm]	Konečná délka vzorku
L_0	[mm]	Počáteční délka vzorku před zkouškou
L_u	[mm]	Konečná délka vzorku po přetržení



I	[mm]	Vzdálenost dvou podpěr
\ln	[mm]	Přírozený logaritmus
M_{0max}	[MPa]	Maximální ohybový moment
m_s	[mm]	Střižná mezera
n	[-]	Koeficient deformačního zpoždění
O		Osa zobrazující tenkou čočku
q	[mm]	Ukazatel tvárivosti
R	[MPa]	Smluvní jmenovité napětí
r_α	[-]	Koeficient normálové anizotropie
R_E	[MPa]	Mez pružnosti
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_{eD}	[MPa]	Dolní mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	Horní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{mo}	[MPa]	Mez pevnosti v ohybu
R_p	[MPa]	Nevýrazná mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R_u	[MPa]	Mez úměrnosti
S_0	[mm ²]	Počáteční průřez vzorku
S_u	[mm ²]	Průřez vzorku po zkoušce
W_0	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu
y	[mm]	Prohnutí vzorku
Z	[%]	Kontrakce
ZRO		Zkouška rozšiřováním otvoru
z	[mm]	Hloubka tahu při zkoušce rozšiřováním otvoru
ΔL	[mm]	Změna délky
Δr	[-]	Plošná anizotropie



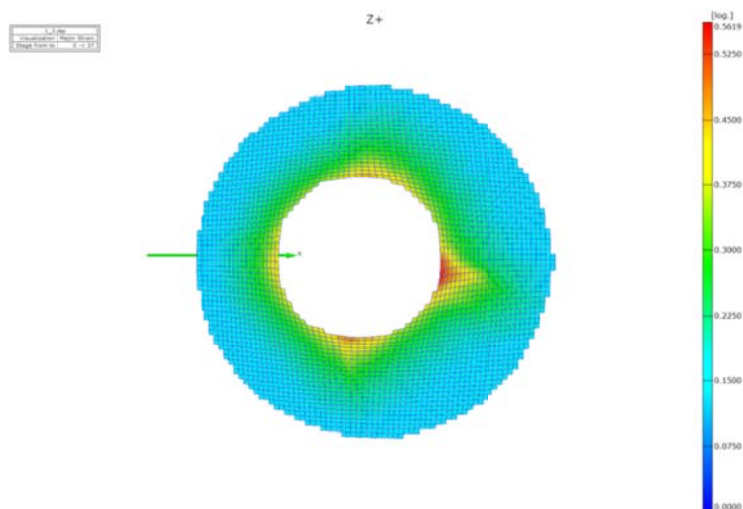
ε	[-]	Poměrné přetvoření
π	[-]	Ludolfovo číslo
σ	[MPa]	Skutečné napětí
φ	[-]	Skutečné přetvoření
φ_c	[-]	Celkové přetvoření

1. Úvod

Technologie tváření kovů jsou velmi používané metody ve strojírenském průmyslu – zejména v automobilovém průmyslu. Tvářecími procesy, jako jsou například kování, lisování, stříhání, ohýbání, se řadí do plošného tváření. Pro tuto bakalářskou práci byla důležitá technologie stříhání, u které byl zjišťován vliv střížné mezery m_s střížníku na velikost přetvoření φ . Důležitou vlastností materiálu pro technologie tváření je tváritelnost, což je schopnost materiálu se deformovat až do jeho porušení. Tato vlastnost daného materiálu se v praxi vyhodnocuje pomocí základních zkoušek, kterými jsou zkoušky tahem, ohybem, krutem a jiné. V praxi jsou používány i technologické zkoušky, které napodobují danou technologii. V této bakalářské práci byla provedena zkouška rozšiřováním otvoru.

V současném automobilovém průmyslu se rozšiřují nové technologie pro vyhodnocování vlastností materiálu pomocí fotogrammetrie. Na jejímž principu pracují optické měřicí systémy, které usnadňují zjištění deformací materiálu při jeho zatěžování. Těmito systémy lze také např. získat kinematické veličiny (posuv, rychlost a zrychlení). Výhodou těchto systémů je jejich přesnost, neboť všechny snímky z průběhu zkoušek jsou ukládány a poté vyhodnoceny.

Cílem této bakalářské práce bylo porovnání výsledků ze zkoušky rozšiřováním otvoru a její vyhodnocení, které v prvním případě bylo provedeno manuálně a druhou variantou bylo vyhodnocení pomocí optického systému ARAMIS. Ukázka rozložení přetvoření φ pro zkoušku rozšiřováním otvoru měřeného pomocí optického systému ARAMIS je ukázána na obr.1.



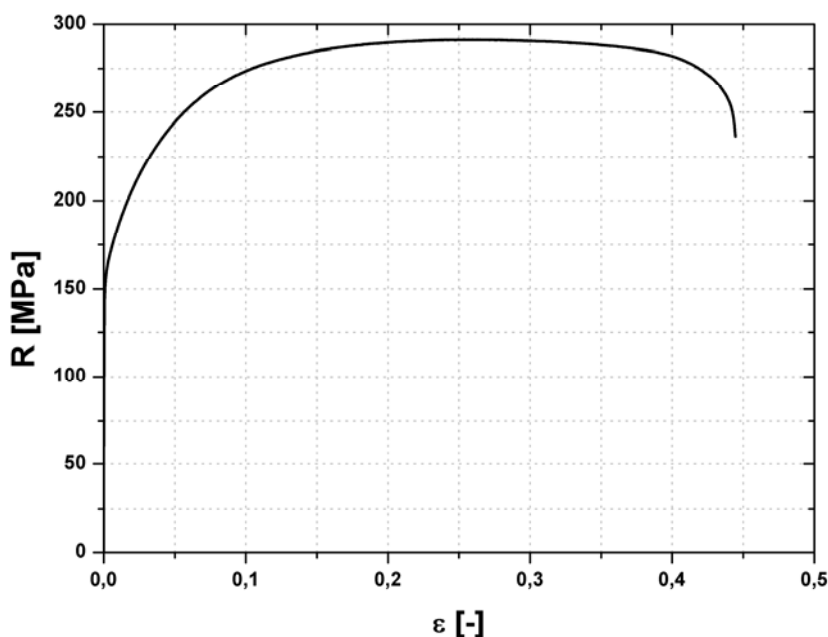
Obr. 1.1 Ukázka deformací ze ZRO vyhodnoceny systémem ARAMIS

2. Tvářitelnost a hodnocení tvářitelnosti

Tvářitelnost nebo-li plasticita je schopnost materiálu se plasticky deformovat až do jeho porušení. K trvalé (plastické) deformaci dochází při překročení napětí nad mez kluzu daného materiálu. Trvalou deformaci umožňuje pohyb dislokací, což je čárová porucha krystalové mřížky materiálu. Při plastické deformaci platí zákon zachování objemu, což znamená, že objem tělesa před deformací je stejný jako po deformaci. Platí tedy, že tvářené těleso změní jen své rozměry nikoli objem.

Tvářitelnost je dána:

- 1) deformační schopností - což je schopnost materiálu plasticky se deformovat do jeho mezních podmínek (do porušení materiálu),
- 2) deformačním odporem - což je napětí, které je potřebné pro překonání tohoto odporu, aby vznikla plastická deformace,
- 3) přetvárnou pevností - to znamená, že materiál musí mít pevnost, která vydrží plastickou deformaci. [1],[2]



Obr. 2.1 Smluvní diagram ze zkoušky tahem [5]

Na obrázku 2.1 je ukázka smluvního diagramu získaného ze zkoušky tahem hlubokotažného materiálu, který je vhodný k tváření.

Na proces tváření mají zejména vliv tyto faktory:

- 1) chemické složení a struktura materiálu – s vyšším procentem uhlíku klesá tvářitelnost a roste pevnost, nejlepší tvářitelnost mají čisté kovy,
- 2) teplota a rychlost deformace – se vzrůstající teplotou roste tvářitelnost (platí do určité teploty),
- 3) velikost deformace – pouze při tváření za studena roste deformační odpor materiálu,
- 4) stavy napjatosti – existuje 9 stavů.

Technologická tvářitelnost: je tvářitelnost vztažená k určitému tvářecímu procesu (např. kování, stříhání, ohýbání,...) [1],[2]

Vyhodnocení tvářitelnosti se provádí pomocí zkoušek, které napodobují reálné zatížení materiálu při provozním zatížení. Zkoušky lze obecně rozdělit podle silového působení na statické nebo dynamické. Další rozdělení je podle teploty, při které jsou zkoušky prováděny - za nízkých, normálních nebo vyšších teplot. Podle typu zkoušky - na základní, technologické (napodobující) a speciální. Zkoušky se následně vyhodnocují pomocí charakteristik a ukazatelů tvářitelnosti, které se získávají z mechanických a technologických zkoušek. Nejvýznamnějšími charakteristikami jsou charakteristiky pevnosti, kterými jsou výrazná mez kluzu R_e , nevýrazná mez kluzu, což je stanoveno jako smluvní mez kluzu R_p a mez pevnosti R_m . Mezi další patří charakteristiky plasticity, což je tažnost A_x , a kontrakce Z . Důležitou charakteristikou pro bakalářskou práci je přetvoření φ (deformace). Při zatížení je deformace složena z pružné a plastické složky. Trvalé deformace po odlehčení jsou deformace plastické, v tvářecích procesech jsou nazývány poměrným přetvořením ε . Deformace válce s počáteční délkou L_0 roste po částech dL až do finální délky L . Platí tedy, že nekonečně malý přírůstek poměrného přetvoření je roven diferenciálnímu přírůstku logaritmické deformace.[1],[3]

$$d\varphi = \pm \frac{dL}{L} \quad (1)$$

$$\text{Logaritmická deformace pak bude } \varphi = \ln \frac{L}{L_0} \quad [-] \quad (2)$$

Přetvoření dané rovnicí (2) platí pro zkoušku tahem.

Zjišťované charakteristiky ukazují, jaký proces je nejvhodnější k tváření daného materiálu.

3. Zkoušky materiálů

Základní zkoušky pro zjišťování tvárnosti jsou statické mechanické zkoušky, do kterých patří zejména zkouška tahem, tlakem, krutem, ohybem. Mezi technologické zkoušky patří např. zkouška lámavosti, zkouška hloubením plechů a pásů podle Erichsena, zkouška rozšiřováním otvorů, atd.[1],[4]

3.1. Zkouška tahem

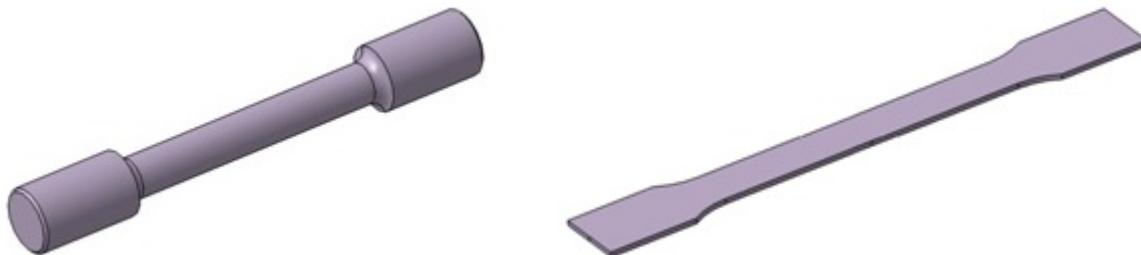
Zkouška tahem patří mezi mechanické statické zkoušky, která je normalizovaná a prováděná při určité teplotě a deformační rychlosti. Jejím principem je zatěžování zkušebního vzorku rovnoměrným zatížením až do jeho porušení. Vzorek zatěžujeme dvěma tahovými silami, které deformují (prodlužují) vzorek. Materiál klade odpor proti deformaci, který se nám do diagramu projeví velikostí příslušného napětí. Vzorek má normalizovanou počáteční délku L_0 i počát. průřez S_0 .

V testovaném materiálu vzniká rovnoměrná jednoosá tahová napjatost. Zkoušku provádíme na trhačích strojích nebo na univerzálních strojích (viz. obr. 3.1).



Obr. 3.1 Trhačí stroj pro zkoušku tahem (firma TIBERINA)

Při zkoušce tahem se zjišťují mechanické vlastnosti, kterými jsou zejména mez kluzu R_e , mez pevnosti R_m , tažnost A_x a kontrakce Z . Pro zkoušku tahem jsou používány dva druhy zkušebních tyček (viz obr. 3.2). Na obr. 3.2 (vlevo) je znázorněná tyč kruhového průřezu, který zvolíme dle normy, na obr. 3.2 (vpravo) je plochá tyč, která se používá jako vzorek u tenkých plechů a pásů. [3],[4],[5],[6],[7]



Obr. 3.2 Kruhová tyč (vlevo) plochá tyč pro zkoušku tahem (vpravo) [5]

Výsledky ze zkoušky tahem jsou zaznamenávány do diagramu. Na obrázku 3.3 je vidět pracovní smluvní diagram a skutečný diagram zkoušky tahem. Pracovní smluvní diagram znázorňuje závislost smluvního napětí R , což je dáno rovnicí (3) a na poměrném prodloužení ε , dáno vztahem (4), což odpovídá diagramu zatěžující síly na celkovém prodloužení ($F-\Delta L$).

Smluvní napětí R :

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Kde: F – příslušná síla

S_0 – počáteční průřez

ε je poměr změny délky ΔL ku počáteční délce zkušební vzorku L_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [-] \quad (4)$$

$$\text{Změna délky: } \Delta L = L_u - L_0 \quad (5)$$

L_u je konečná délka vzorku po přetržení a L_0 je počáteční délka vzorku.

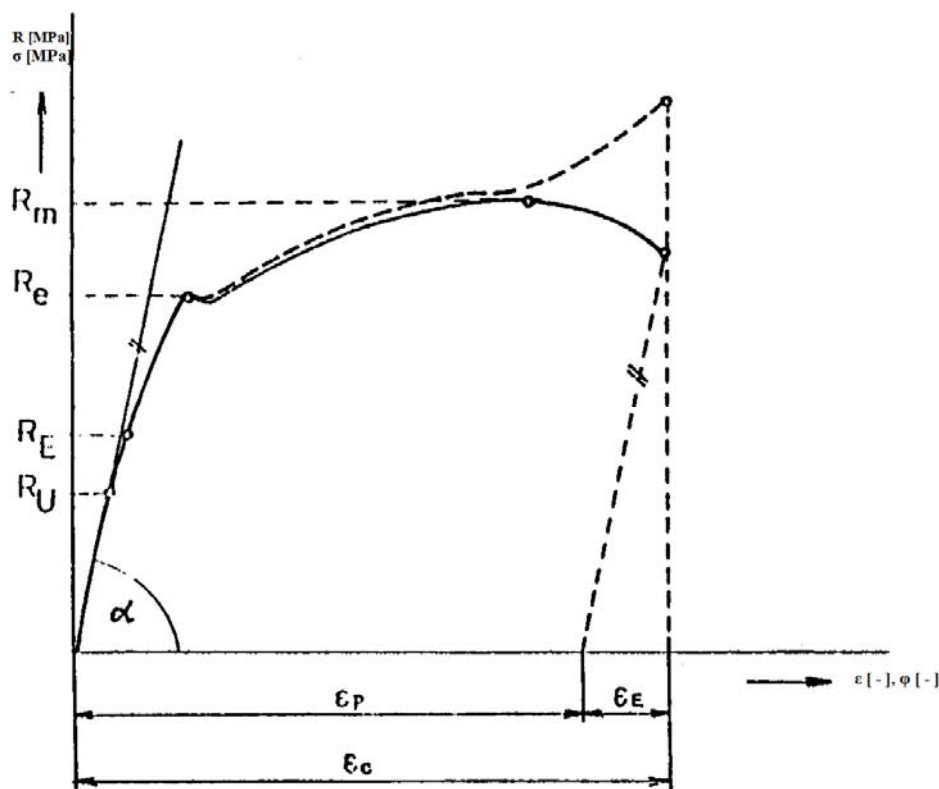
Skutečný diagram je závislost skutečného napětí σ na velikosti skutečného (logaritmického) přetvoření φ . Příslušné napětí σ je dáno zatěžující silou F ku průřezu S , který odpovídá danému zatížení (6)

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Velikost přetvoření φ je dáno vztahem:

$$\varphi = \ln \frac{L}{L_0} \quad [-] \quad (2)$$

Což je logaritmická deformace konečné délky zkoušeného vzorku L ku počáteční délce L_0 .



Obr. 3.3 Pracovní a skutečný diagram ze zkoušky tahem [9]

Obr. 3.3 diagram popisuje chování vzorku při jeho zatěžování. Do bodu meze úměrnosti R_u platí Hookeův zákon - tedy, že napětí σ (R) je přímo úměrné prodloužení ε .

Bod R_E se nazývá mez pružnosti – což je napětí, které po odlehčení nevyvolá na vzorku trvalé deformace, do této části jsou jen pružné deformace.

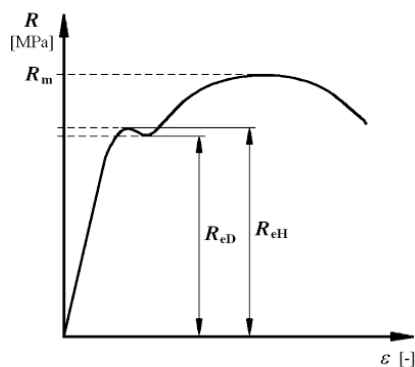
Důležitou hodnotou z diagramu je bod R_e – mez kluzu v tahu. V tomto místě se zkušební vzorek stále deformuje a to bez zvyšujícího se napětí. Tento bod určuje přechod z plastické deformace na trvalou.

Existují různé typy meze kluzu z nichž jsou nejdůležitější:

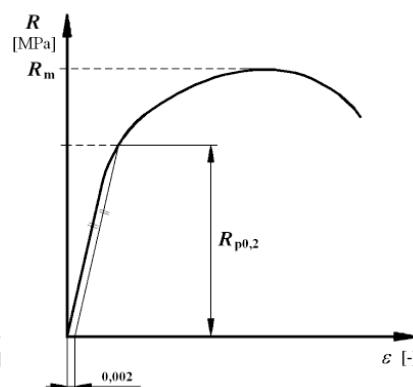
- 1) Výrazná mez kluzu R_e – je u uhlíkových ocelí (viz obr. 3.4).
- 2) Nevýrazná mez kluzu – je u tvrdých ocelí a litin. Při nevýrazné mezi kluzu se udává smluvní mez kluzu, což je napětí, při kterém trvalá deformace nabude smluvní hodnoty v % z poč. měřené délky. Například smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ je napětí, které způsobí 0,2% trvalé deformace ε (viz obr. 3.5).

- 3) Deformačně vystárlý materiál – vzniká tzv. Lüdersova prodleva, která je dána dolní mezí kluzu R_{eD} a horní mezí kluzu R_{eH} (viz obr. 3.6).

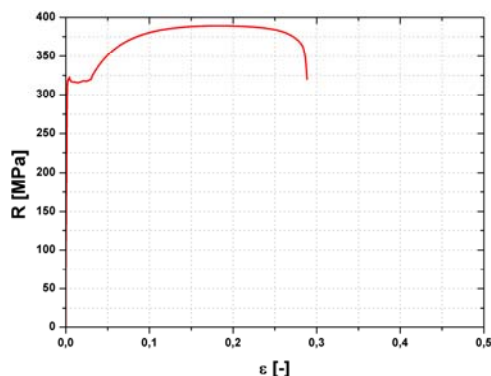
Obrázek 3.7 zobrazuje průběhy křivek různých materiálů získané ze zkoušky tahem.[5],[8]



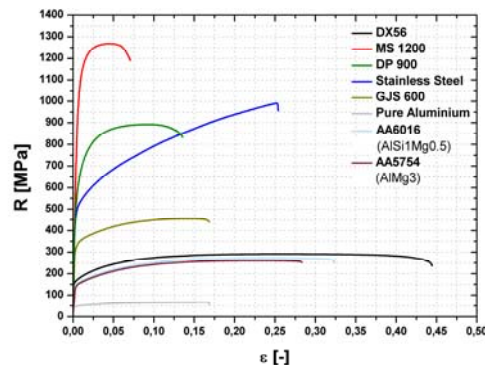
Obr. 3.4 Mater. s výraznou mezí kluzu [8]



Obr. 3.5 Mat. s nevýraznou mezí kluzu [8]



Obr. 3.6 Diagram deformačně vystárleho materiálu [5]



Obr. 3.7 Křivky ze zkoušky tahem různých materiálů [5]

Další důležitá veličina z diagramu je mez pevnosti v tahu R_m , což je maximální napětí (zátížení) F_{max} zkušební tyče ku počátečnímu průřezu vzorku S_0 .

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (7)$$

Ostatní důležité vlastnosti získáme pomocí výpočtů.

Tažnost A_x je poměr změny délky ΔL ku počáteční délce zkušební vzorku daná v %. Nebo-li poměrná deformace ε vyjádřená v procentech.

$$A_x = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Tažnost musí mít vždy index x , který charakterizuje zkušební tyčku. U ploché tyčky obr. 3.2 (vpravo) index x znázorňuje počáteční délku L_0 a nejčastěji je zkoušená délka vzorku 50mm nebo 80mm. U kulaté tyčky obr. 3.2 (vlevo) index x znázorňuje poměr mezi počáteční délkou L_0 ku počátečnímu průměru zkoušeného vzorku S_0 dána rovnicí:

$$x = \frac{L_0}{d_0} \text{ a nejčastější velikost indexu } x \text{ je } 5 \text{ nebo } 10. \quad (9)$$

Kontrakce (zúžení) Z je poměr rozdílu průřezů $S_0 - S_u$ ku počátečnímu průřezu S_0

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

S_0 je počáteční průřez vzorku a S_u je nejmenší průřez vzorku před jeho porušením.

Kontrakce je nejspolehlivějším ukazatelem plasticity. Jako hranici plasticity při poměrném zúžení se bere 50%, klesnutí kontrakce pod tuto hodnotu zapříčiní vznik trhlin a je třeba udělat opatření pro obnovu plasticity.

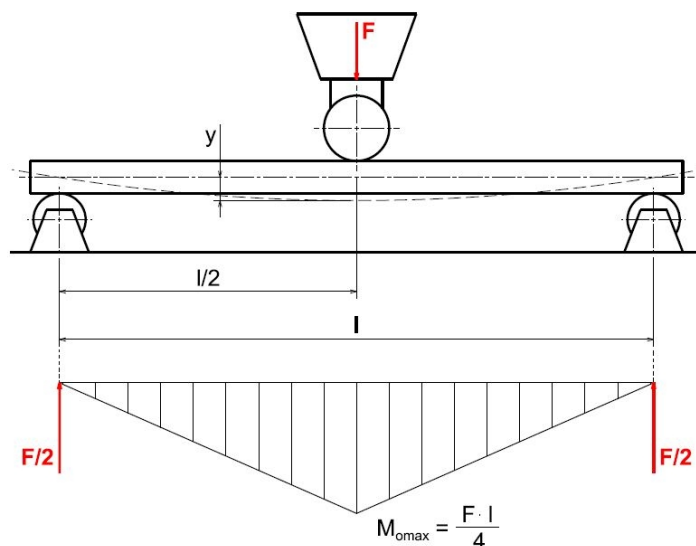
Posledním ukazatelem je poměr meze kluzu a meze pevnosti, pokud splňuje materiál podmínku z rovnice (11), pak lze tvrdit, že má materiál dobrou plasticitu.

$$\frac{R_e}{R_m} \leq 0,65 \quad (11)$$

Tyto veličiny jsou velmi důležité pro vyhodnocování tvářitelnosti materiálů.[3],[4],[5],[6],[7],[8]

3.2. Zkouška ohybem

Zkouška ohybem je technologická zkouška a patří mezi statické mechanické zkoušky pro křehké materiály jako je např. šedá litina. Zkouška se provádí většinou až do porušení testovaného materiálu. Lze ji provádět i na houževnatých materiálech, u nichž nedojde k porušení zkušební tyče, ale dojde k její trvalé deformaci (prohnutí). Princip zkoušky ohybem je schematicky znázorněn na obrázku 3.8 [4]



Obr. 3.8 Princip zkoušky ohybem a výsledný zatěžující diagram

Zkušební vzorek má nejčastěji válcový tvar, který se ustaví na dvě podpěry a v polovině je zatěžován silou.

Pomocí zkoušky ohybem zjišťujeme nejčastěji pevnost v ohybu zkoušeného materiálu R_{mo} dle rovnice (12) .

$$R_{mo} = \frac{M_{max}}{W_0} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

M_{max} je největší ohybový moment, který se určí z rovnice (13) :

$$M_{max} = \frac{F_{max} \cdot l}{4} \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (13)$$

F_{max} – je maximální zatěžující síla při zkoušce

l – je vzdálenost podpěr

a W_0 je průřezový modul v ohybu, který je pro kruhový průřez dán rovnicí (14):

$$W_0 = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \text{ [mm}^3] \quad (14)$$

d – průměr vzorku, který má kruhový průřez

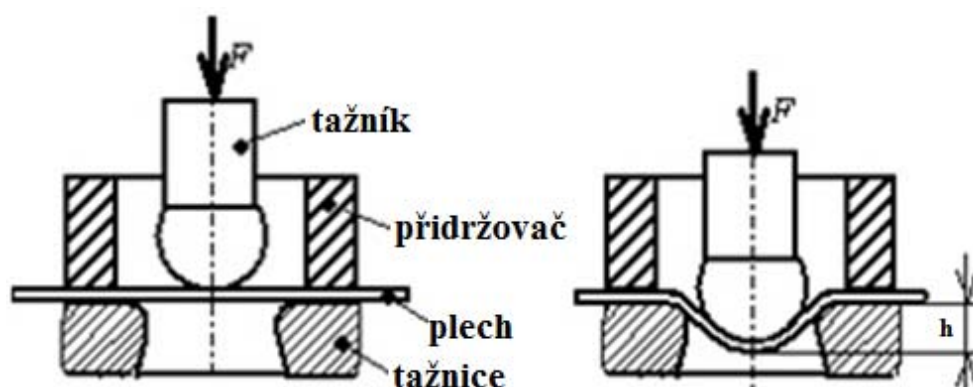
Schopnost materiálu se deformovat se určuje pomocí maximálního prohnutí y , který nastane při lomu tyče uprostřed podpěr. Zatěžující síla v závislosti na prohnutí je zaznamenávána do pracovního diagram zkoušky ohybem. [1],[4],[10]

3.3. Zkouška hloubením dle Erichsena

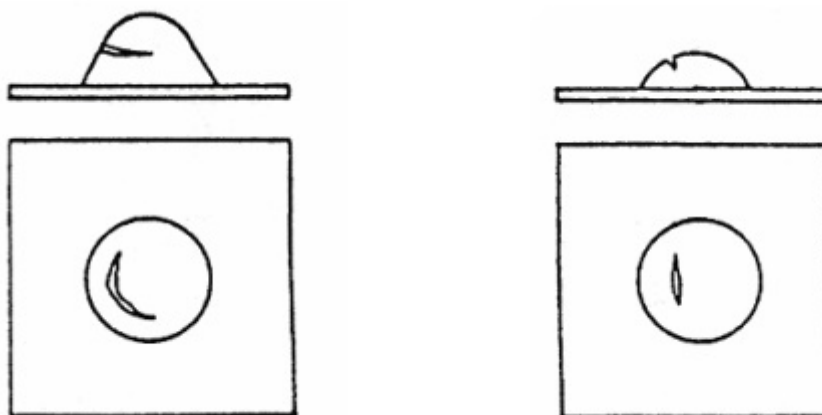
Zkouška hloubením dle Erichsena je používána k zjištění plastické deformace plechů a pásů. Zkouška napodobuje technologické tvářecí procesy jako je např. tažení, lisování, atd. a její princip je zobrazen na obrázku 3.9. Zkoušený materiál je vložen na tažnici a upevněn přidržovačem, který zabraňuje zvlnění materiálu. Poté tažník, který je zakončen ocelovou kuličkou o průměru 20mm, je puštěn konstantní silou až do porušení materiálu, což je prasklina přes celou tloušťku plechu. Vyhodnocujícím parametrem je hloubka prohloubení h . Dále se posuzuje velikost i umístění trhliny, podle které je určována vhodnost materiálu k tváření. Povrch na vnější straně testovaného vzorku je dalším z hledaných parametrů:

- 1) pokud je hrubý, znamená to hrubou krystalizaci materiálu a nevhodnost k tváření.
- 2) v případě hladkého povrchu vzorku znamená, že materiál je vhodný k tvářecím procesům.

Zkouška je rychlá a průkazná o vhodnosti materiálu k procesu tváření. Nevýhodou mohou být různé výsledky měření i pro dva stejné materiály. Na obrázku 3.10 jsou dva rozdílné výsledky v utvoření trhliny po provedené zkoušce. Zatímco na obr. 3.10 (vlevo) je tvar hlubokotažného plechu a umístění trhliny, které je vhodné k tváření, tak na obr. 3.10 (vpravo) je tvar prohloubení materiálu a výskyt trhliny, který není vhodný k tvářecím procesům. [1],[4],[8],[12]



Obr. 3.9 Princip zkoušky hloubením dle Erichsena [11]



Obr. 3.10 Materiál vhodný k tvářecím procesům (vlevo) a materiál nevhodný k tvářecím procesům (vpravo) [4]

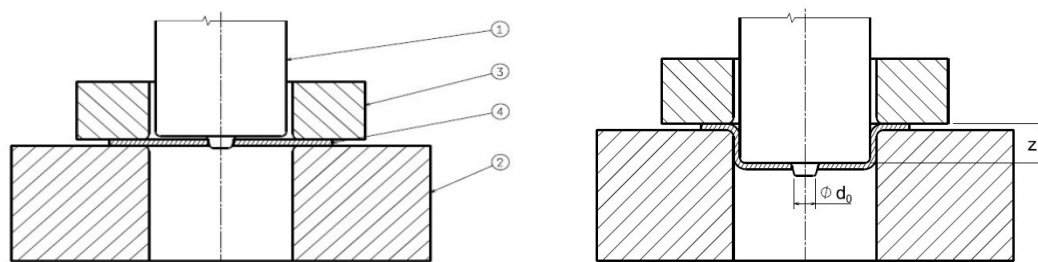
3.4. Zkouška rozšiřováním otvoru

Zkouška rozšiřováním otvoru (ZRO), která bývá též nazývána zkouškou dle Siebela a Pompa, je zkouška technologická, prováděná za normální teploty a slouží k vyhodnocování vhodnosti materiálu pro proces tváření. Princip zkoušky spočívá v tom, že do zkoušeného materiálu se vytvoří technologií stříhání kruhový otvor. Velikost otvoru je nejčastěji 10 mm nebo 20 mm. Připravený vzorek je umístěn na tažnici a upnut pomocí přidržovače. Zkouška rozšiřováním otvoru není příliš rozšířená v praxi.[4],[8],[13]

Existují dva druhy tažníku pro provedení zkoušky:

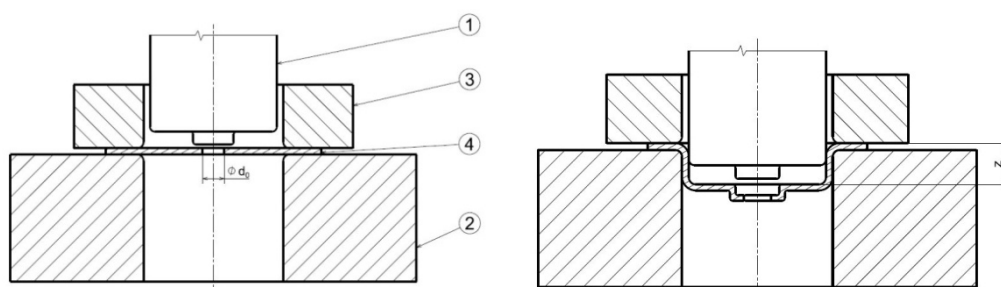
- 1) Kuželovitý tažník a jeho posuvem tento kužel otvor rozšiřuje (viz obr. 3.11).
- 2) Ploché tažník o průměru větším, než je otvor ve vzorku (viz obr. 3.12)

U kuželovitého tažníku se do připraveného otvoru o průměru d_0 (viz obr. 3.11) začne postupně vtlačovat tažník, který je vtlačen do zkušební tělesa buď ze shora, nebo ze zdola. Ploché tažník je vtlačován do zkoušeného materiálu a tím se vystřižený otvor rozšiřuje (viz obr. 3.12). Během zkoušky se sleduje hrana otvoru a při prvotním tvoření trhliny je zkouška ukončena. V ten okamžik je tažník zastaven.



Obr. 3.11 Princip zkoušky rozšiřováním otvoru kuželovým tažníkem

Na obrázcích 3.11 a 3.12 jsou znázorněny: 1 - tažník, 2 - tažnici, 3 – přidržovač
a 4 – testovaný plech s počátečním otvorem d_0 .



Obr. 3.12 Princip zkoušky rozšiřováním otvoru plochým tažníkem

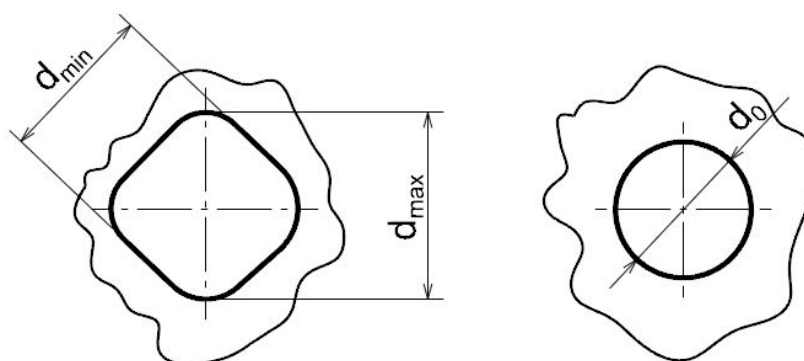
Poté se vyhodnotí hloubka tahu z , poměrné rozšíření otvoru d' , skutečné přetvoření φ a plošná anizotropie.

Poměrné rozšíření otvoru d' se vypočítá ze vzorce (15):

$$d' = 0,5 \cdot (d_{max} - d_{min}) \quad [mm] \quad (15)$$

Plošná anizotropie Δr způsobí, že rozšířený otvor po zkoušce nebude zcela kruhový (viz obr. 3.13 - vlevo) a je dána vztahem (16):

$$\Delta r = \frac{d_{max} - d_{min}}{d'} \quad [-] \quad (16)$$



Obr. 3.13 Průměr otvoru před zkouškou (vpravo) a po zkoušce (vlevo)



Přetvoření se získá z rovnice (17):

$$\varphi = \ln \frac{d_f}{d_0} \quad [-] \quad (17)$$

d_f je průměr otvoru po zkoušce získaný z rovnice (18):

$$d_f = \frac{d_{max} + d_{min}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

Ukazatelem tváritelnosti je veličina:

$$q = \frac{z \cdot (d_{max} + d_{min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d_{max} - d_{min})} \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

Kde: z - je hloubka tahu

Pro rovnice (15),(16),(18),(19) platí, že:

d_{max} – je maximální průměr otvoru po rozšíření [mm]

d_{min} – je minimální průměr otvoru po rozšíření [mm].

Pro rovnice (17),(19) platí, že:

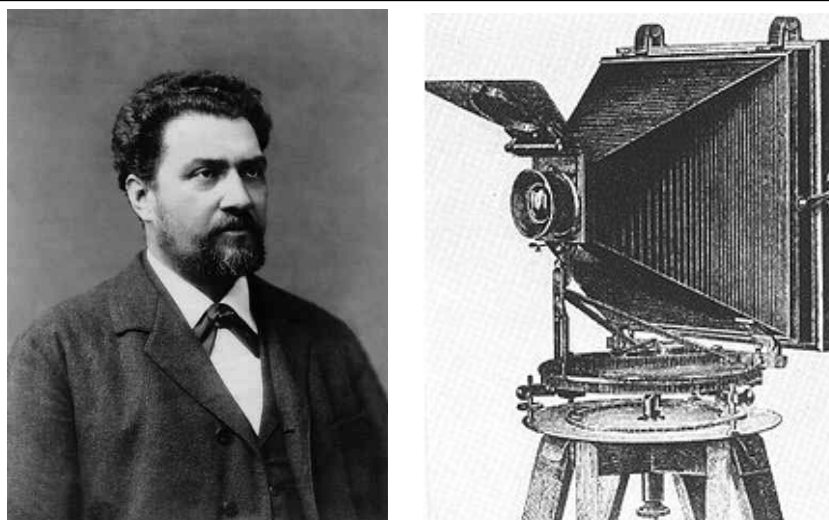
d_0 je počáteční průměr otvoru vzorku (viz obr. 3.13 - vpravo) [mm].

4. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědní obor, který podává informace o předmětech, které byly vyfoceny. Pojmenování fotogrammetrie je získané spojením slov foto - fotografie a grammetrie - měření. Získané informace podávají jednotlivé charakteristiky těles, jako jsou poloha, tvar, rozměr, atd. Fotogrammetrie je v současnosti rozšířenou metodou pro zjišťování již zmíněných vlastností. Tento obor je využíván především v geodézii při mapování prostoru, ve stavebnictví pro záznamy budov a ve strojírenství. V tomto oboru je velice široké využití např. sledování přesnosti montáže a proměřování dílů v automobilovém průmyslu, hodnocení vlastností materiálů apod. Výhodou tohoto oboru je, že snímky lze pořídit snadno a poměrně v krátké době a následné vyhodnocení provést nezávisle v laboratoři. Měření lze kdykoli ověřit nebo doplnit z uchovaného záznamu. Měření ve strojírenství je nejčastěji vyhodnocováno pomocí optických systémů, které zjišťují nejen rozměry (digitalizace), ale např. i kinematické vlastnosti měřeného předmětu. Fotogrammetrie je velmi přínosná v širokém rozsahu.[7],[8],[14],[15]

4.1. Historický vývoj fotogrammetrie

Počátek fotogrammetrie je spojen s dírkovými komorami (camera obscura), které byly popsány I.A.H. Haitkamem a Leonardem da Vincim. Roku 1657 byla zkonstruována první přenosná kamera (box camera) Schottem Kasperem. Důležitým vynálezem pro rozvoj fotogrammetrie byl vynález fotografie Niepcem a Daquerrem roku 1839. Ta byla pro praktické účely v tomto oboru využita ve Francii při mapování terénu v roce 1861. Odborný termín „fotogrammetrie“ byl poprvé vyřknut Němcem A. Meydenbauerem (viz obr. 4.1 - vlevo) roku 1858, který sehrál velkou roli při tvoření fotogrammetrické dokumentace historických objektů a stvořil první grafické vyhodnocení snímků. Na obrázku 4.1 (vpravo) je zobrazena kamera vynalezená roku 1872 A. Meydenbauerem.



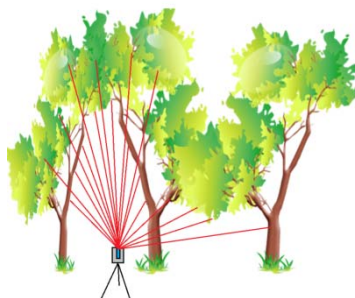
Obr. 4.1 Vynálezce A. Meydenbauer (vpravo) a přenosná kamera z 1872 (vlevo) [16]

Pro pozemní fotogrametrii byly používány fototeodolity, které zkonstruoval Porro (1865) a roku 1895-1896 Koppe a Finsterwalder. Začátkem 20. století byl sestrojen první stereokomparátor, který je velmi přesný pro měření objektů z fotografického záznamu a možného zjištění souřadnic objektu. Za tento objev se zasloužil Dr. C. Pulfrich. Na začátku 1. světové války nastal rozvoj leteckého snímání. Jeho výsledky se získávaly pomocí optického projekčního multiplexu. V meziválečném období nastal rozvoj analogového vyhodnocování snímků. Po druhé světové válce vynalezly nové analytické metody (Schmid-1953 a Schut-1958), ale prudký rozvoj tohoto druhu hodnocení nastal až od roku 1980. Od té doby se zdokonaloval vývoj výpočetní techniky a ten umožnil vznik prvních digitálních systémů. Po roce 1995 přišlo zlepšování digitálních fotoaparátů a vývoj programů pro hodnocení ve 3D. Digitální fotogrammetrie a její vyhodnocování se od této doby velmi rozrostlo, neboť došlo ke zlevnění procesu a snazšímu snímání objektů.[14]

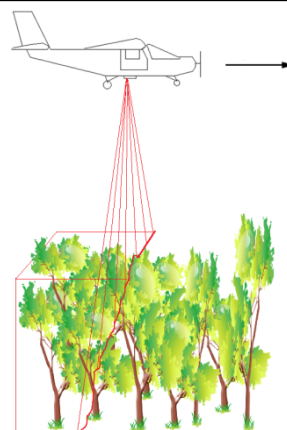
Fotogrammetrie lze obecně rozdělit:

1) *Podle místa z něhož byl snímek pořízen*

- a) Pozemní fotogrammetrie – snímek pořízen zpravidla z nepohyblivého místa na zemi (viz obr. 4.2).
- b) Letecká – snímek pořízen v pohybu a nad zemí (viz obr. 4.3).
- c) Družicová – používána pro tvoření fotomap.



Obr. 4.2 Pozemní fotogrammetrie [8]



Obr. 4.3 Letecká fotogrammetrie [8]

2) Podle počtu pořízených snímků

- a) Jednosnímková fotogrammetrie – určení pouze rovinných souřadnic.
- b) Dvousnímková – vyhodnocení v prostorových souřadnicích.
- c) Vícesnímková – potřeba nejméně dvou snímků, které se vzájemně překrývají. Vyhodnocení ve 3D souřadnicích.

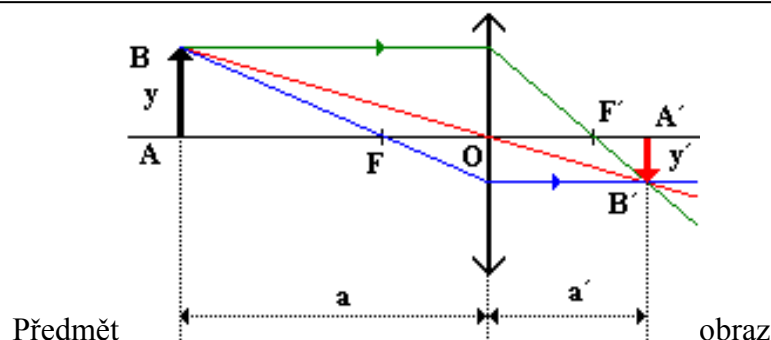
3) Podle způsobu zpracování snímků

- a) Analogová metoda – tato technologie je již v dnešní době nahrazena jinými metodami.
- b) Analytická metoda – souřadnice jsou zjišťovány ze snímků na přesných strojích a poté se provede transformace na počítači.
- c) Digitální metoda – souřadnice měřeny přímo z digitálního obrazu.

Vyhodnocení záznamu lze graficky nebo číselně (numericky). V současnosti je hodnocení souřadnic numericky, kdy se výsledek uloží přímo do paměti stroje, na kterém se daný záznam vyhodnocuje.[7],[8],[14]

4.2. Základy optického zobrazení

Pro vyhodnocování fotografie je důležité zobrazení. Jeho promítání se uskutečňuje opticky. Základním prvkem pro získání fotografického záznamu je objektiv, který je složen z několika optických členů např. čočky. U skutečného objektivu musíme uvažovat tloušťku těchto čoček. Proto má objektiv určenou osu, která prochází jeho středem. Na této ose leží středy křivosti čoček (viz obr. 4.4)



Obr. 4.4 Zobrazení tenkou čočkou [17]

Na obrázku je znázorněn předmět A , osa O zobrazuje tenkou čočku a bod A' vytváří obraz. Vzdálenost a je předmětová vzdálenost, bod F značí předmětové ohnisko. Kóta a' popisuje obrazovou vzdálenost, F' je ohnisko obrazu a f je ohnisková vzdálenost. Zobrazovací rovnice pro tenkou čočku je:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (20)$$

Kde:

a – předmětová vzdálenost

a' – obrazová vzdálenost

f – ohnisková vzdálenost.

Z foceného předmětu vychází paprsky, které dopadají na objektiv. Do obrazu se přenesou pouze paprsky, které projdou clonou. Takto získaný obraz lze vyhodnotit pomocí optických systémů.[14]

4.3. Optické měřicí systémy

V současnosti jsou optické systémy důležitou součástí pro fotogrammetrii především ve strojírenství. Měření předmětů, které se těmito systémy zjistí, následně slouží k jejich digitalizaci. Ve strojírenství mohou být tyto systémy používány také pro vyhodnocování deformačního chování materiálů. Ve strojírenství je používáno mnoho optických systémů od různých firem. Známou firmou v tomto oboru je německá firma GOM, od které jsou systémy - ARAMIS, ARGUS, PONTOS a ATOS, které jsou dvousnímkové. Systém TRITOP je od této firmy systémem jednosnímkovým, takže vytváří souřadnice ve 2D. Dalším výrobcem optických systémů je firma Steibichler. Měření v této bakalářské práci se bude vyhodnocovat pomocí systému ARAMIS, který zde proto bude představen podrobněji. Dále budou popsány podobné systémy ARGUS a PONTOS. [7],[8],[18],[19]

4.3.1. Optický systém ARAMIS

Optický měřicí systém ARAMIS je vhodný k zjišťování deformačního chování materiálů a jeho vhodnost k tváření. Systém ARAMIS je vhodnou volbou pro snímání vzorků při zkoušce materiálu a pomůže k vyhodnocení vlastností zkoušeného materiálu. Systém ARAMIS je dvousnímkový, takže souřadnice objektu jsou dané ve 3D. Snímky zprostředkovávají dvě digitální kamery, které jsou umístěny na tyči (viz obr. 4.5 - vlevo).



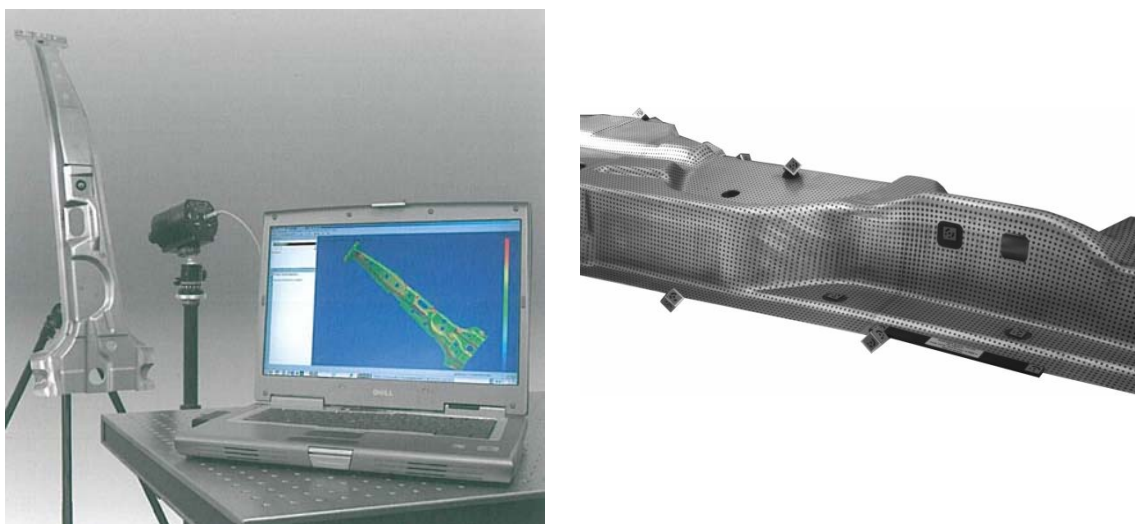
Obr. 4.5 Optický systém ARAMIS [19] (vlevo) a stochastická síť na vzorku (vpravo)

Dalšími prvky vedle dvou kamer jsou dvě svítilny a laser, který slouží pro vyrovnaní mechanismu při kalibraci. Svítilny jsou důležité pro dobré nasvícení a rozlišení zkoumaného objektu. Na vzorek, který bude měřen tímto systémem se musí nanést deformační síť. Ta je vytvořena na odmaštěném vzorku nastříkáním bílé barvy, na níž je posléze nanesená černá barva (znovu nastříkáním) ve formě nepravidelných černých teček, které vytvoří stochastickou síť (viz obr.4.5 - vpravo).

Z důvodu žádané přesnosti je nutno souřadný systém ARAMIS před samotným měřením kalibrovat. V tomto systému je to použitím kalibrační destičky, která je opatřena kalibračními body. Podle potřeb softwaru se destička umístí do správné polohy. Kalibrace systému je důležitá pro určení měřicího objemu dvou kamer při snímání, jelikož měřené body mimo daný objem se nezaznamenávají. Snímky jsou pořizovány ve zvolené frekvenci (běžně 6 -12 fps) a jsou ukládány do počítače, na kterém pomocí softwaru se vyhodnotí zkoušený předmět. Software zapisuje deformace podle posunu deformační sítě, která je rozdělená na tzv. fazety, což si optický systém určuje podle poměru bílé a černé plochy na snímaném vzorku. Software si podle této sítě určí velikost šedi v jednotlivých fazetách a podle jejich posunutí se určí velikost deformace. Systém ARAMIS má velké rozlišení a dostatečnou přesnost a proto je v současné době používán především v automobilovém průmyslu.[7],[8],[19]

4.3.2. Optický systém ARGUS

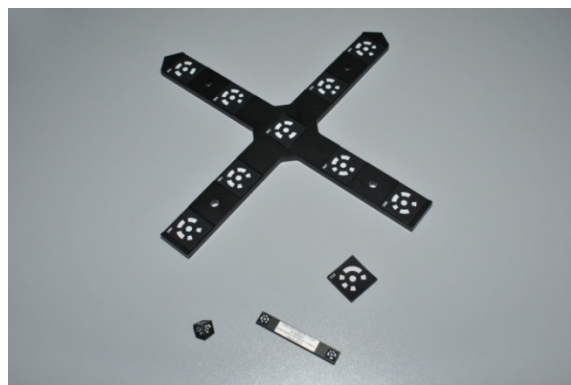
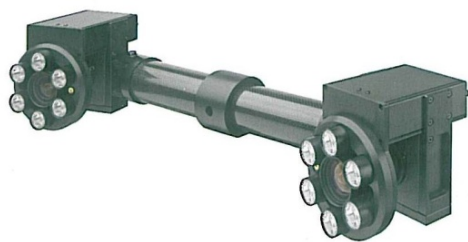
Systém ARGUS patří k dvousnímkovým mechanismům jako je ARAMIS a PONTOS. Od těchto systémů se liší v použití jen jedné digitální kamery, která zkoumaný objekt snímá před a po zkoušce z různých poloh (viz obr. 4.6 - vlevo). Použití systému ARGUS je velmi podobné jako u optického systému ARAMIS, tedy především pro zjišťování deformací zatěžovaného materiálu a jeho vlastností. Odlišností je způsob nanesení a vzhled deformační sítě potřebné pro dobré snímání digitální kamerou. Na odmaštěný vzorek je síť vytvořena elektrochemickým naleptáním a její vzhled je pravidelné uspořádání tmavých teček na světlém podkladu (viz obr. 4.6 - vpravo). Následně se systém zkalibruje pomocí kalibračních kamenů, na kterých jsou umístěny kalibrační body. Kalibrační kameny zůstávají po celém průběhu zkoušky na zkoušeném vzorku (viz obr. 4.6 -vpravo) Poloha se zaznamenává podle změny velikosti a polohy černých bodů do počítače pomocí fotogrammetrie, kde je pomocí softwaru vyhodnoceno celé měření. Optický systém je používán pro hodnocení způsobu tváření a chování materiálu při těchto procesech.[7],[8],[19]



Obr. 4.6 Snímání systémem ARGUS (vlevo) a připravený vzorek – (vpravo) [19]

4.3.3. Optický systém PONTOS

Systém PONTOS funguje na stejném principu jako ARAMIS. Rozdíl je v použití dvou snímacích digitálních kamer (viz obr.4.7), kde každá má laserový hledáček, jsou umístěné na tyči. V jejím středu je také laser. Tyto lasery slouží k správnému vyrovnaní mechanismu a natočení kamer nad nebo před snímaným objektem. Vzdálenost kamer od objektu je dána velikostí měřeného předmětu. Systém PONTOS nepoužívá nastříkanou síť jako u systému ARAMIS, ale je řešena připevněním reflexních bodů přímo na měřený objekt. Podle množství a uspořádání bodů je zvolena frekvence snímání. Posunutím a deformací těchto značek je určována změna polohy a vytváří se 3D obraz těchto bodů. Před měřením je důležitá kalibrace, která je prováděna pomocí kalibračního kříže (viz obr.4.7). Systém PONTOS je využíván pro dokumentaci objektů a zaznamenávání jejich případných deformací a vibrací. PONTOS je primárně využíván pro zjišťování kinematických veličin (posuv, rychlost a zrychlení) měřených objektů. Lze jej však také využívat např. při zjišťování vibračního chování testovaných objektů (např. autosedačka). Optický systém PONTOS má největší použití v automobilové a letecké fotogrammetrii.[7],[8],[15],[19]



Obr. 4.7 Systém PONTOS (vlevo) a kalibrační kříž (vpravo) [19]

5. Experimentální část

V experimentální části bylo cílem zjistit skutečné hodnoty přetvoření φ zkoušeného materiálu pomocí zkoušky rozšiřováním otvoru. Vyhodnocení této zkoušky bylo provedeno, nejen pomocí manuálního měření a výpočtu dle vzorce (17) pro zjištění přetvoření φ , ale i druhou variantou pro získání výsledků, která spočívala v použití optického systému ARAMIS. Naměření obou způsobů zkoušky bylo provedeno v laboratořích katedry strojírenské technologie v areálu Technické univerzity v Liberci. Vyhodnocení druhé varianty bylo provedeno v počítačové učebně této katedry. Cílem pokusu bylo porovnání výsledků z obou variant vyhodnocení zkoušky rozšiřováním otvoru.

5.1. Popis testovaného materiálu

Cílem bakalářské práce bylo zjištění citlivosti střížné mezery na hlubokotažném materiálu. Tím byl materiál označen jako HX220BD Z100 MCO od výrobce Salzgitter. Materiál měl tloušťku 0,65 mm, která je důležitá pro vyjádření vlivu střížné mezery v %. Mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu jsou napsány v tabulce 1.

Tab. 1. Mechanické vlastnosti testovaného hlubokotažného materiálu (HX220BD Z100 MCO)

Směr válcování [°]	Základní mechanické vlastnosti HX220BD Z100 MCO				
	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]	Koeficient deformačního zpevnění n [-]	Koeficient normálové anizotropie r_a [-]
0°	253	358	35,2	0,182	1,15
45°	262	369	31,4	0,175	0,89
90°	254	359	34,7	0,184	1,43

5.2. Zkoušky rozšiřováním otvoru - příprava vzorků

Pomocí připravené šestidílné sady střížníků (viz obr. 5.2. - vlevo) byl pomocí střížného nástroje (viz obr. 5.2. - vpravo), následně do kruhových přístřihů (viz obr. 5.1) vystřížen kruhový otvor o průměru 10mm s různým nastavením střížné mezery m_s . Celkem tedy byly pro každou střížnou mezeru připraveny 3 kusy. Velikost střížné mezery m_s odpovídá příslušnému střížníku - jak je uvedeno v tabulce 2.



Obr. 5.1 Kruhové přístřihy



Obr. 5.2 Sada střížníků (vlevo) a střížný nástroj (vpravo)

Střížná mezera střížníků se zvyšovala. V tabulce 2 jsou zobrazeny dvě možnosti vyjádření střížné mezery ke každému střížníku z šestidílné sady. První řádek jsou hodnoty střížné mezery v [mm], které jsou dány z polovičních vzdáleností

mezi střížnicí a střížníkem. V druhém případě jsou hodnoty dány jako poměr střížné mezery vůči tloušťce zkoušeného materiálu v %.

Tab. 2. Hodnoty střížných mezer pro použité střížníky

Číslo střížníku	1	2	3	4	5	6
m_s [mm]	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4
m_s [%]	1,54	12,3	24,6	36,9	49,2	61,5

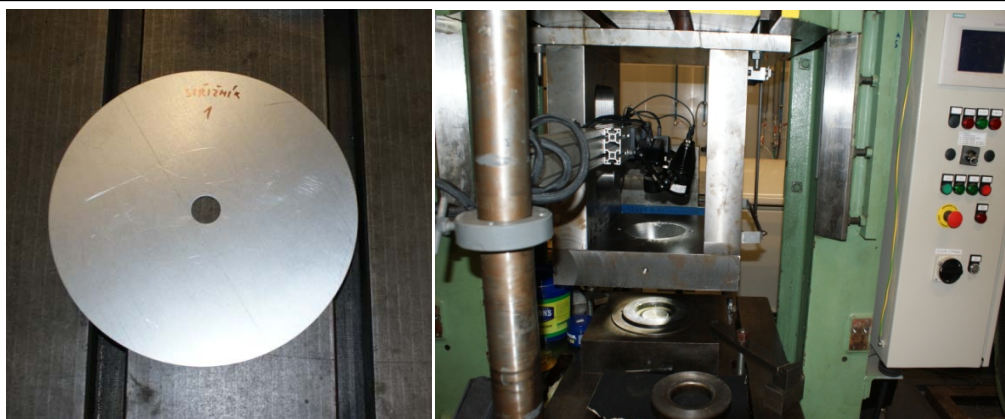
Vystřížené počáteční otvory d_0 byly změřeny a následně jejich průměry ze 3 dílů z každé skupiny byly zaznamenány do tabulky 3 a takto připravené vzorky (celkem 18) byly podrobeny zkoušce rozšiřováním otvoru.

Tab. 3. Hodnoty počátečních průměrů otvorů

Číslo střížníku	1	2	3	4	5	6
Průměr počátečního otvoru d_0 [mm]	0,01	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4

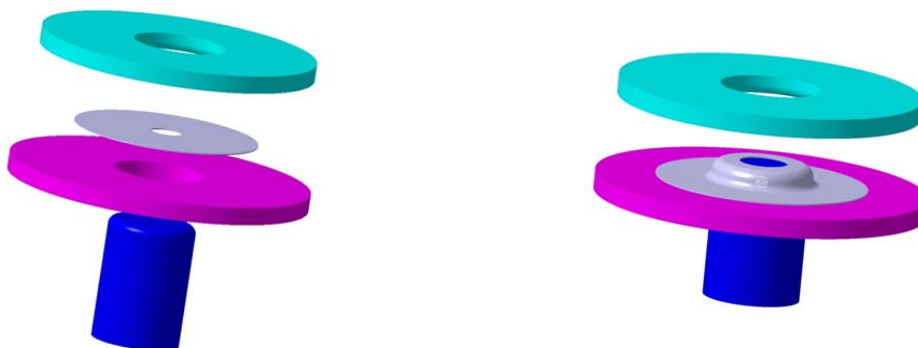
5.3. Zkoušky rozšiřováním otvoru - manuální měření

Vzorky byly připraveny pro podrobení zkouškou rozšiřováním otvoru. Měření bylo určeno pro vyhodnocení manuálním způsobem za pomoci digitálního posuvného měřítka. Díly byly před zkouškou popsány čísly střížníků, kterým byl otvor vytvořen (viz obr. 5.3 - vlevo). Stroj, na kterém byla zkouška rozšiřováním otvoru prováděna, byl připraven v laboratořích katedry strojírenské technologie (viz obr. 5.3 - vpravo). Na obrázku je vidět systém ARAMIS, který byl připraven pro druhou variantu zkoušení. Pro první variantu byl systém v nečinnosti kromě osvětlení, které bylo využito pro lepší viditelnost tvoření první trhliny.



Obr. 5.3 Vzorek pro zkoušku rozšiřováním otvoru (vlevo) a zařízení pro zkoušku rozšiřováním otvoru (vpravo)

Díly byly postupně vkládány do stroje a upevněny pomocí přidržovače. Pro zkoušku byl použit válcový tažník a jeho pohybem byl otvor rozšiřován (viz obr. 5.3 -vpravo). Na obrázku 5.4 je zobrazen: tažník (tmavě modrou barvou), testovaný materiál (šedou barvou), horní přidržovač (světle modrou barvou) a spodní přidržovač (fialovou barvou).[20]



Obr. 5.4 Princip zkoušky rozšiřování otvorů [20]

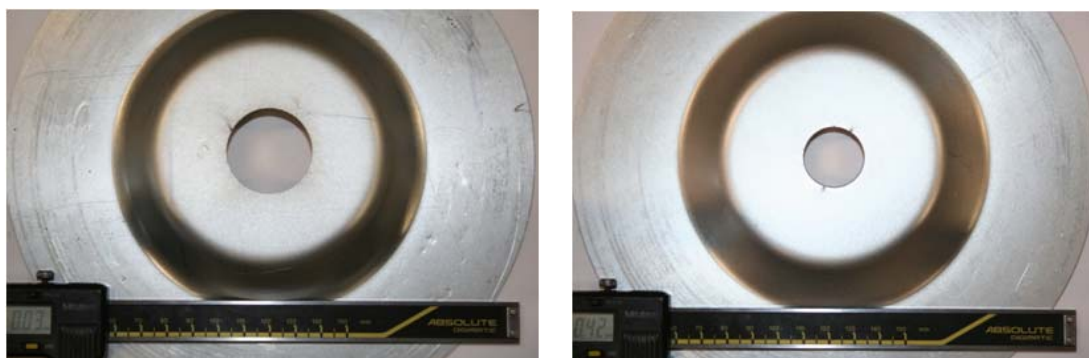
Tažník byl spuštěn konstantní rychlostí a průběh rozšiřováním otvoru byl sledován. Při vytvoření první viditelné trhliny, která byla přes celou tloušťku plechu, byl tažník zastaven. Tímto způsobem byla provedena zkouška rozšiřováním otvoru pro všech 18. Dílů a vzorky podrobené zkouškou rozšiřováním otvoru byly připraveny na vyhodnocení velikosti přetvoření φ , které lze spočítat pomocí rovnice (17).

$$\varphi = \ln \frac{d_f}{d_0} \quad [-] \quad (17)$$

Kde: d_0 je počáteční průměr otvoru před zkouškou [mm]

d_f je konečný průměr po provedení zkoušky rozšiřováním otvoru. [mm]

Každý díl byl změřen pomocí digitálního posuvného měřítka. Počáteční průměry do otvorů jsou zapsány v tabulce 3. Rozšířený otvor po zkoušce není rovnoměrný, proto je změřen největší průměr a zároveň minimální průměr otvoru. Na obrázcích 5.5 jsou znázorněny otvory po rozšíření. Obr. 5.5 (vlevo) je rozšířený otvor vzorku, který byl stříhán střížníkem s nejmenší střížnou mezerou a na obr. 5.5 (vpravo) je naopak díl střížen střížníkem s největší střížnou mezerou.



Obr. 5.5 Otvor po ZRO střížen střížníkem s $m_s = 0,01$ (vlevo) a otvor po ZRO střížen střížníkem s $m_s = 0,4$ (vpravo)

Průměr otvoru po zkoušce byl získán z rovnice (21).

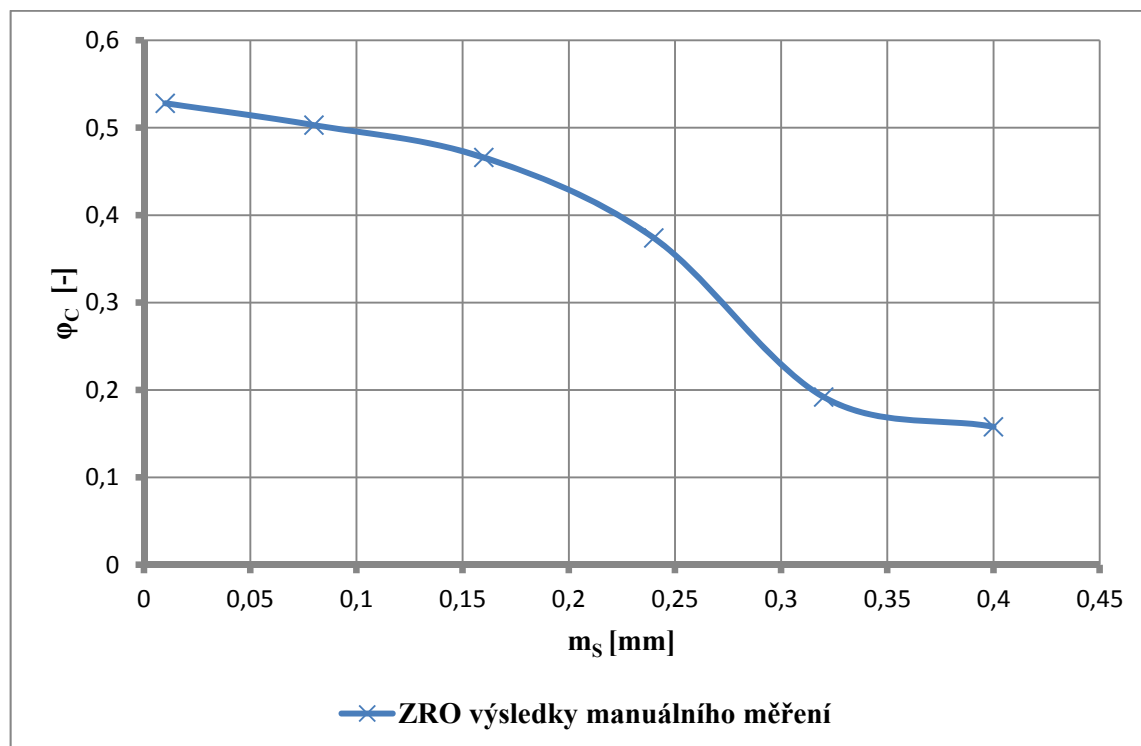
$$d_f = \frac{d_{max} + d_{min}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

Následně bylo spočítáno přetvoření φ každého vzorku a zapsáno do tabulky 4.

Tab. 4. Výsledky manuálního měření testovaných vzorků

Číslo vzorku	Přetvoření φ [-]	Čísla střížníků					
		1	2	3	4	5	6
Vzorek č.1	φ	0,523	0,494	0,483	0,391	0,187	0,145
Vzorek č.2	φ	0,508	0,513	0,452	0,349	0,219	0,171
Vzorek č.3	φ	0,554	0,502	0,463	0,381	0,171	0,159
	Aritmetický průměr přetvoření φ_c [-]	0,528	0,503	0,466	0,374	0,192	0,158

Po následném vyhodnocení φ byly hodnoty zobrazeny do grafu jako závislost φ na velikosti střížné mezery m_s v mm. Do grafu (viz obr. 5.6) bylo znázorněno aritmetický průměr hodnot přetvoření φ_c ze tří vzorků z každé skupiny. Z tohoto důvodu bude v grafu zobrazeno šest hodnot.



Obr. 5.6 Graf výsledku přetvoření získané pomocí manuálního měření

Dle výsledků zobrazených v grafu je zřejmé, že u dílů, které byly vystřiženy pomocí prvních tří střížníků ze sady, kde hodnoty přetvoření φ klesají pozvolna. Tudíž střížná mezera těchto tří střížníků nemá tak velký vliv na výsledky přetvoření φ . Naopak mezi střížníky 3 až 5 je vliv střížné mezery na velikost přetvoření patrný, což je znázorněno poklesem křivky. Pokles křivky se zmírnil po skupině dílů vystřiženy střížníkem číslo 5. Takže vliv střížné mezery mezi posledními střížníky je minimální. Závěrem je, že střížná mezera má vliv na velikosti přetvoření, neboť mezi prvním a posledním střížníkem je rozdíl přetvoření $\varphi = 0,37$.

5.4. Zkoušky rozšiřováním otvoru - měření optickým systémem ARAMIS

Druhá zkouška rozšiřování otvorů byla vytvořena za účelem získání výsledků na základě principu fotogrammetrie. K zaznamenávání průběhu zkoušky a její vyhodnocení byl použit optický systém ARAMIS. Zkouška byla provedena v laboratořích strojírenské technologie jako při manuálním měření. Pro měření bylo použito 18 totožných vzorků jako pro první variantu. Jejichž otvory byly zhotoveny stejnými střížníky, jako u první varianty (viz obr.5.2.). Optický systém ARAMIS potřebuje větší přípravu vzorků, aby se mohly vyhodnotit výsledky přetvoření materiálu, ale vlastní průběh zkoušky je identický jako při první variantě pokusu. Obecně se systém ARAMIS, skládá ze dvou digitálních kamer, dvou světel a z laserového hledáčku, umístěného na tyči. Celé zařízení bylo umístěno do stroje nad přidržovač tak, aby kamery byly namířeny na prostor, kde je zkouška prováděna (viz obr. 5.7 - vpravo). Součástí zařízení ARAMIS je software, do kterého se ukládají nasnímané obrázky v průběhu zkoušky (viz obr 5.7 - vlevo). Software definuje kalibraci systému a tím k přesnosti měření.



Obr. 5.7 Systém ARAMIS nad rozšiřovacím nástrojem (vpravo) a software systému ARAMIS (vlevo)

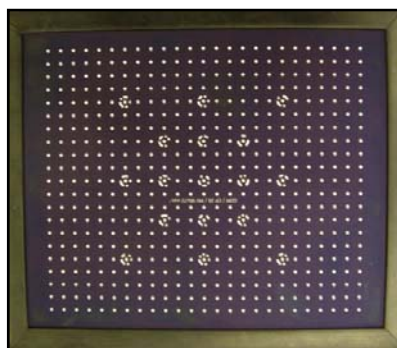
Před zahájením měření je nutná příprava vzorků. V první fázi tvoření deformační sítě bylo zapotřebí odmastit všech osmnáct dílů pomocí acetonu. Poté se nastříkala na celý vzorek bílá barva, která se nechala důkladně zaschnout. Po zaschnutí bílé barvy byly díly nastříkány barvou černou. Barva se nanášela z větší vzdálenosti, aby vytvořila na bílém podkladu nepravidelnou deformační síť v podobě malých černých teček. Bylo důležité, aby nevznikala velká místa černé barvy

(viz obr. 5.8), což by zabránilo optickému systému zaostřit a rozpoznat deformační síť. Stochastická síť je důležitá pro systém, který si rozděljuje síť na tzv. fazety. Podle jejich posunů se vyhodnocují deformace vzorku.



Obr. 5.8 vzorky s deformační sítí

Před vlastním provedením zkoušky bylo potřeba systém ARAMIS zkalibrovat, což bylo provedeno nejen vyrovnaním laserového hledáčku do osy rozšiřovacího nástroje, ale i za pomoci kalibrační destičky (viz obr. 5.9). Podle předem definovaného postupu kalibrace bylo s destičkou posouváno a otáčeno v prostoru, čímž byl vytvořen tzv. kalibrační objem. Takto zkalibrovaný systém byl připraven ke správnému snímání průběhu zkoušky. Vzorky byly vloženy do stroje nad rozšiřovací nástroj a připevněny přidržovačem. Pro systém ARAMIS bylo potřeba zaostření a rozpoznání nanesené sítě. Z jejího pohybu a její deformace byly určovány výsledky. Po dokončení těchto přípravných fází se přistoupilo k provedení zkoušky. Nástroj byl spuštěn konstantní rychlostí a materiál se deformoval.

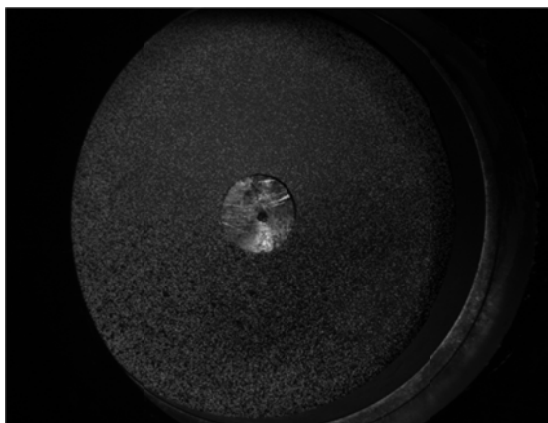


Obr. 5.9 Kalibrační destička pro systém ARAMIS

Celý průběh byl zaznamenáván do programu ARAMIS (v podobě snímků po celou dobu pokusu). Po první trhlině po celé tloušťce vzorku byl nástroj zastaven.

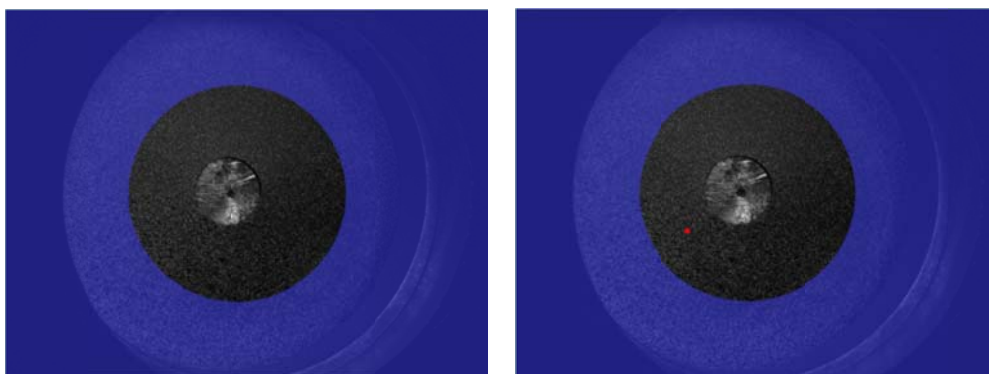
V programu byla nastavena rychlost frekvence snímkování a ukládání šesti snímků za sekundu. Vyhodnocení bylo následně provedeno v učebně na katedře strojírenské technologie.

Výpočet hodnot přetvoření φ proběhl v programu ARAMIS v. 6.3.0 - 64 bit. Na začátku zjišťování gradientu přetvoření φ byly do programu ARAMIS staženy snímky v počáteční poloze (před zahájením zkoušky) - jak je zobrazeno na obr. 5.10.



Obr. 5.10 Snímek vzorku před zkouškou

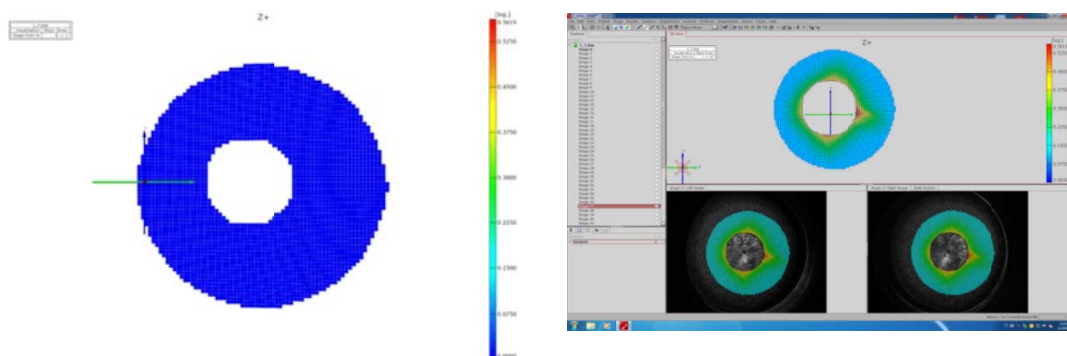
Poté se v programu označila oblast (tzv. maska), kde probíhaly deformace při zkoušce rozšiřováním otvorů (viz obr.5.11 - vlevo). Plocha s modrou maskou do výpočtu φ se nezahrnuje, neboť v této části nedochází k žádným podstatným deformacím, což urychlí výpočet přetvoření. To znamená, že nedochází k výraznému posunu specifické sítě v těchto místech. V místě, které bylo vygenerováno do výpočtu deformací (bez masky), byl vybrán jeden bod (viz obr. 5.11 - vpravo) – tzv. startovací bod. Podle posunů bodu program počítá hledanou hodnotu φ .



Obr. 5.11 Vygenerovaná plocha a maska (vlevo) a zvolený bod (vpravo)

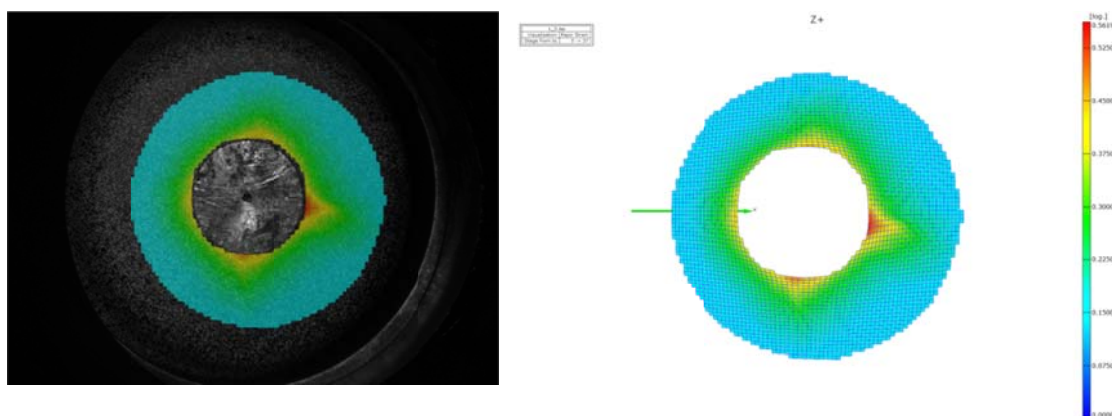
Po označení bodu se spustilo vyhodnocení přetvoření φ ze všech pořízených snímků jednoho vzorku. Pokud systém zaznamenal chybu při vyhodnocení, musel

být označen jiný bod v deformované části. Chyba mohla nastat, když systém v označeném místě nerozlišil deformační síť nebo pokud zvolený bod vyšel do prostoru trhliny. Po projetí bodu všemi snímky byly vygenerovány výsledky hodnoty přetvoření φ (viz obr. 5.12). Na obr. 5.12 (vlevo) je znázorněna nulová deformace dílu. Na obr. 5.12 (vpravo) je zobrazen snímek, kde již proběhla deformace dílu. Když byly všechny snímky daného vzorku vyhodnoceny, hledal se snímek, na kterém se objevila první trhlina. Poté se z daného snímku opsala potřebná hodnota přetvoření.



Obr. 5.12 Nulové deformace vzorku (vlevo) a ukázka výpočtu systému ARAMIS (vpravo)

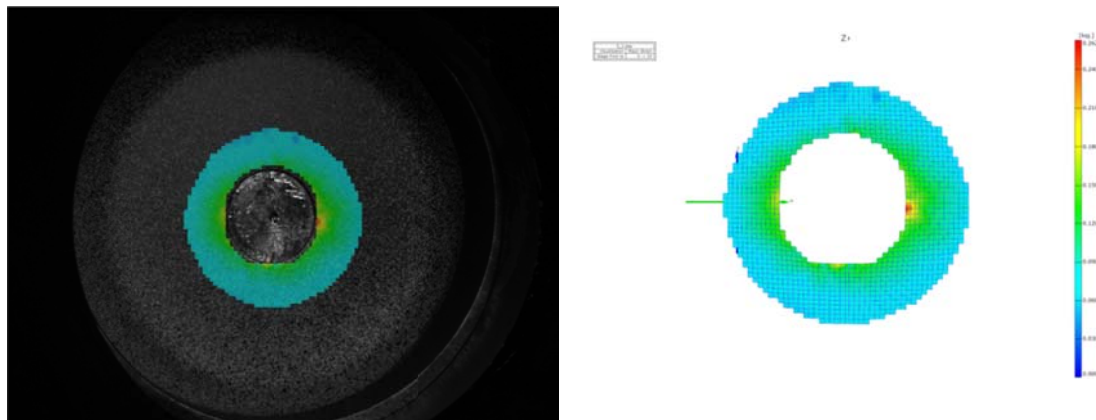
Tímto postupem bylo vyhodnoceno všech 18 vzorků. První se hodnotily vzorky jejichž otvory byly vystřiženy střížníkem s nejmenší střížnou mezerou $m_s = 0,01$ mm. Na obrázku 5.13 (vlevo) je zobrazena deformace na vzorku a na obr. 5.13 (vpravo) jsou znázorněny hodnoty přetvoření φ .



Obr. 5.13 Průběh deformací na vzorku (vlevo) a vyhodnocení přetvoření φ (vpravo) vystřižen střížníkem s $m_s = 0,01$ mm

Stejným způsobem se pokračovalo u každého vzorku z šesti skupin. Poslední skupinou byly vzorky vystřiženy střížníkem s největší střížnou mezerou

$m_s = 0,4$ mm, u kterých je vidět, že hodnoty přetvoření jsou výrazně nižší než u vzorků ve skupině 1. Na obrázku 5.14 (vlevo) je zobrazeno tvoření deformace na díle a na obr. 5.14 (vpravo) je znázorněno vyhodnocení hodnot přetvoření φ .



Obr. 5.14 Průběh deformací na vzorku (vlevo) a vyhodnocení přetvoření φ (vpravo) vystřižen střížníkem s $m_s = 0,4$ mm

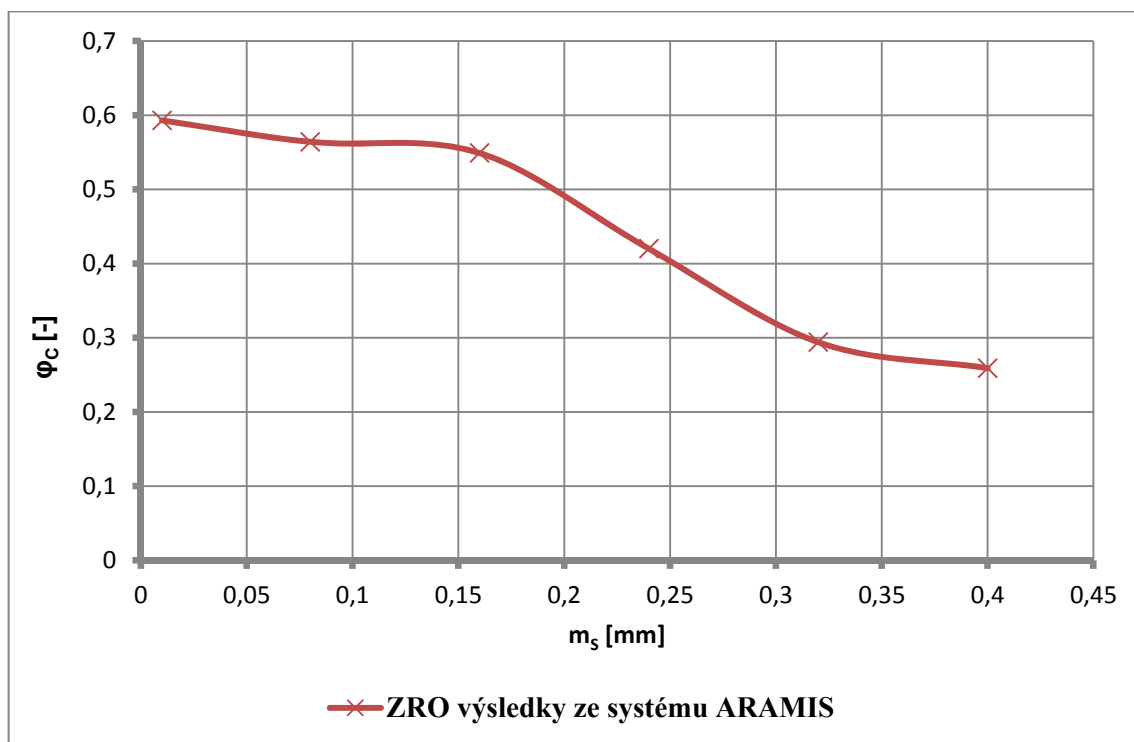
Všechny získané hodnoty φ byly zapsány do tabulky 5 a ze tří získaných hodnot se spočítal aritmetický průměr těchto hodnot, což je v tabulce označeno jako φ_c .

Tab. 5. Hodnoty získané systémem ARAMIS

Číslo vzorku	Přetvoření φ [-]	Čísla střížníků					
		1	2	3	4	5	6
Vzorek č.1	φ	0,631	0,589	0,552	0,421	0,302	0,268
Vzorek č.2	φ	0,586	0,584	0,546	0,407	0,288	0,263
Vzorek č.3	φ	0,562	0,520	0,549	0,434	0,292	0,247
	Aritmetický průměr přetvoření φ_c	0,593	0,564	0,549	0,420	0,294	0,259

Všechny zprůměrované hodnoty φ_c se znázornily do grafu (viz obr. 5.15) v závislosti na velikosti střížné mezery v mm. V grafu jsou znázorněny výsledky přetvoření φ

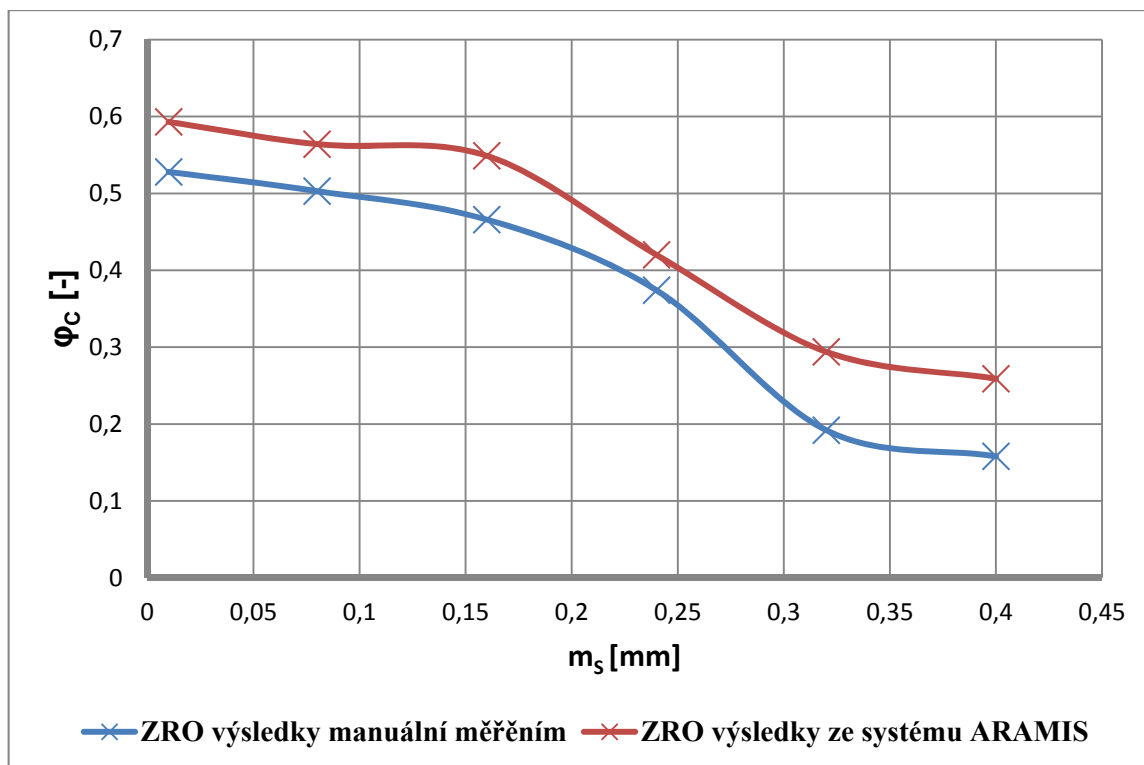
získané pomocí systému ARAMIS. Největší vliv střížné mezery je mezi stěžníky s mezerami $m_s = 0,16$ mm a $0,32$ mm stejně jako u vyhodnocení manuálního měření.



Obr. 5.15 Graf výsledků přetvoření φ_c získané ze systému ARAMIS

6. Porovnání výsledků a doporučení pro další výzkum

V této části se oba způsoby měření zkoušky rozšiřováním otvoru porovnávají. Nejdůležitějším faktorem pro porovnávání byly výsledky přetvoření φ získané manuálním vyhodnocením vzorků a vyhodnocení výsledků pomocí optického systému ARAMIS. Tyto výsledky se pro porovnání zobrazily v grafu (viz obr 6.1.), kde je přetvoření φ v závislosti na střížné mezeře m_s .



Obr. 6.1 Porovnání výsledků z obou variant měření

V grafu je vidět stejný průběh obou křivek ve smyslu klesání těchto křivek. Největší pokles je zřejmý mezi střížnými mezerami $m_s = 0,16$ mm a $m_s = 0,32$ mm, což ukazuje vysokou citlivost testovaného materiálu na technologii stříhání. U hlubokotažných materiálů je tento úkaz typický. Odlišnosti mezi oběma křivkami jsou ve velikosti přetvoření φ_c . Výsledky získané pomocí optického systému ARAMIS jsou vyšší než ty, které se získaly manuálním měřením.

Důvody pro výsledky přetvoření φ získané systémem ARAMIS jsou vyšší:

- 1) systém ARAMIS měří velikost přetvoření přímo před vznikem budoucí trhliny v místě, kde je největší gradient φ (viz obr. 6.2).

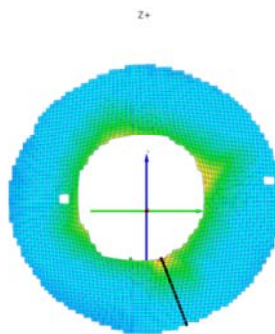
2) systém ARAMIS zaznamenává do výpočtu i pružnou část deformace, tento vliv na zvýšení přetvoření φ je ovšem minimální.

Při manuálním měření dochází k průměrování hodnot přetvoření φ po celém obvodu otvoru měřeného vzorku, čím velikost přetvoření φ klesá. Dalším důvodem nižších hodnot přetvoření φ získané manuálním měřením je, že na vzorku už je jen vliv trvalé plastické deformace. Dalšími důsledky odlišností výsledku přetvoření φ_c , u manuálního měření jsou ty, že náznak utvoření trhliny nelze v jejím počátku odhalit a vlivem plastické deformace proces v daný okamžik zastavit.

Výsledkem tohoto měření je, že pokud je třeba získat průběh křivky přetvoření různých střižníků, stačí zkoušku rozšiřováním otvoru provést pro manuální vyhodnocení, neboť je tato varianta rychlejší, méně pracná a bez použití přídavných zařízení. Pokud je třeba v praxi přesných hodnot, je výhodnější použít optický systém ARAMIS, neboť vyhodnocení je přímo ze snímku před vytvořením trhliny, což je výhodou systému. Snímky jsou ukládány a lze je archivovat pro případnou kontrolu výsledků. Nevýhodou jsou pořizovací náklady na tento systém a nutná znalost optického systému. Tento proces je i časově náročnější než manuální měření zkoušky. Pro firmy, které se zabývají tvářením plechů je optický systém dobrou volbou pro zdokonalení hodnocení vlastností materiálů.

Doporučení pro další výzkum:

- 1) Testování různých materiálových skupin (hlubokotažné mat., pevnostní mat., slitiny hliníku).
- 2) Zkusit změnit vyhodnocení ZRO metodice používané při tvorbě diagramů mezních přetvoření.
- 3) Zkusit toto měření také pro otvory připravené nekonvenčním způsobem dělení materiálu (plazma, laser, vodní paprsek,...).



Obr. 6.2 Ukázka místa, z kterého jsou odečteny hodnoty přetvoření φ

7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést zkoušku rozšiřováním otvoru a z této zkoušky zjistit hodnoty přetvoření. Vyhodnocení přetvoření φ bylo provedeno dvěma způsoby. První variantou bylo manuálním měřením za pomoci digitálního posuvného měřítka. Druhý způsob vyhodnocení výsledků byl proveden optickým systémem ARAMIS od firmy GOM. Obě varianty vyhodnocení výsledků přetvoření φ byly porovnány a zaznamenány do grafu. Testovaným materiálem byl hlubokotažný materiál označen jako HX220BD Z100 MCO od výrobce Salzgitter.

Obě varianty měření zkoušky rozšiřováním otvoru byly provedeny v laboratoři katedry strojírenské technologie na stroji TIRAtest 2300, na němž byl nainstalován optický systém ARAMIS. Pro obě varianty zkoušky rozšiřováním otvoru bylo připraveno 18. kruhových přístřihů s otvorem. Pro měření systémem ARAMIS se tyto vzorky musely nastříkat bílým sprejem a po jeho zaschnutí nanesení barvy černé v podobě malých teček, aby byla vytvořena stochastická síť, která je za potřeby pro snímání systémem ARAMIS. Vyhodnocení výsledků manuálním měřením bylo provedeno přímo v laboratoři, na rozdíl od druhé varianty, která se musela vyhodnotit v počítačové učebně katedry strojírenské technologie, neboť bylo zapotřebí programu ARAMIS v.6.3.0.

Dle grafu, který zobrazuje porovnání výsledků je zřejmé, že měření pomocí optického systému ARAMIS je přesnější než manuální měření. Průběhy křivek z obou měření jsou velice podobné, jen hodnoty získané systémem ARAMIS jsou vyšší. Tato skutečnost je dána zejména díky okamžiku vyhodnocení systémem ARAMIS. Jednalo se totiž vždy o okamžik těsně před vznikem trhliny, kdy je hodnota přetvoření φ maximální. V případě manuálního měření se nicméně „průměrují“ hodnoty přetvoření φ po celém obvodu měřeného otvoru.

Hlavním cílem experimentální části bylo zjišťování citlivosti testovaného materiálu na technologii stříhání. Z vypočtených výsledků z obou variant měření je vidět, že otvory vystřižené střížníkem s nejmenší střížnou mezerou mají největší hodnotu přetvoření φ . Se zvětšující se střížnou mezerou použitých střížníků ze sady se výsledky přetvoření φ snižují. Z hlediska experimentální části této bakalářské práce je vidět, že použitá metoda zjišťování hodnot přetvoření φ má vliv pouze na velikost těchto hodnot nikoliv na průběh citlivosti testovaného materiálu na technologii stříhání.



8. Seznam použité literatury

- [1] HLUCHÝ a KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. Praha: pedagogické nakladatelství, 2002.
- [2] PETRUŽELKA, J.; SONNEK, P.: Tvařitelnost kovových materiálů. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2009.
- [3] FOREJT a PÍŠKA. M. Technologie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006.
- [4] Ošťádal, J.: Zkoušky tvařitelnosti a jejich uplatnění v praxi. Bakalářská práce. Brno: VUT v Brně, 2011.
- [5] Sobotka, J.: Cvičení z předmětu Teorie tváření kovů a plastů. Liberec: Katedra strojírenské technologie - Fakulta strojní, TU v Liberci.
- [6] ČSN EN 10002-1: Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty, 2002.
- [7] Horák, L.: Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci 2011.
- [8] Žďárský, J.: Vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci 2012.
- [9] <http://tzs.kmm.zcu.cz/material2.pdf> (březen 2013).
- [10] ČSN EN ISO 7438: Kovové materiály – Zkouška ohybem, 2005.
- [11] <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm> (březen 2013).
- [12] ČSN EN ISO 20482: Kovové materiály – Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena, 2004.
- [13] ČSN ISO 16630: Kovové materiály – Plechy a pásy - Zkouška rozšiřováním otvoru, 2009.
- [14] Pavelka, K.: Fotogrammetrie, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2003.
- [15] VOLEK, A.: Metodika souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos. Diplomová práce. Brno: VUT v Brně, 2008.



- [16] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie> (duben 2013).
- [17] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/481-zobrazeni-tenkou-cockou>.
- [18] <http://www.gom.com> (duben 2013).
- [19] <http://www.mcae.cz> (duben 2013).
- [20] Sobotka, J. a Spol.: Utilization of the Contact-less Optical System for the Bore Expansion Test. Liberec: TU v Liberci 2013.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. května 2013

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. May 2013

Signature: